

UNIDAD 10: MODELOS DE CULTIVOS

Introducción

Los modelos de simulación de crecimiento de cultivos y el análisis del sistema suelo-planta-atmósfera son herramientas importantes para la investigación agrícola moderna. Un modelo de cultivos representa de manera sencilla y sintética los procesos fisiológicos y ecológicos más importantes que gobiernan el crecimiento utilizando ecuaciones matemáticas. Nuestra comprensión del funcionamiento y evolución de los principales factores responsables de estas condiciones es adquirida comparando resultados de la simulación con observaciones experimentales. Estas observaciones se pueden diseñar para validar el modelo teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas, edáficas y de manejo del cultivo según el lugar de implantación. Una vez realizada esta primera etapa de validación del modelo, el mismo puede ser utilizado para ayudar a analizar e interpretar distintos escenarios futuros producto de modificaciones que deseen proponerse en el manejo del cultivo, cambios en las condiciones climáticas o para pronóstico de rendimiento. Puede también ser utilizado con fines de investigación tal como el diseño de geno-tipos para mejoramiento varietal, análisis de años anteriores con bajos rendimientos, optimización en el gerenciamiento de las tareas de siembra y cosecha, análisis de sensibilidad de factores meteorológicos, edáficos, hidrológicos y en los estudios de la división agroecológica del cultivo en zonas geográficas.

Uno de los modelos actualmente disponible para cultivo de arroz desarrollado por investigadores del Internacional Rice Research Institute (IRRI) es el modelo ORYZA2000 (versión 2.12, 2004). Este es un modelo ecofisiológico de crecimiento y desarrollo que permite realizar simulaciones en condiciones óptimas de nitrógeno y agua para obtener los rindes potenciales según las condiciones climáticas del lugar y simulaciones de situaciones con limitantes de agua y nitrógeno gracias a los submodelos de balance de estos insumos. Estima la evapotranspiración potencial y simula los balances de radiación y CO₂ en la planta para obtener la evolución en el tiempo de materia verde, seca, índice de área foliar, crecimiento de tallos, raíces, hojas y granos.

Los códigos fuente del modelo ORYZA2000 han sido escritos en FORTRAN Simulation Environment (FSE).

Antecedentes

Estos modelos de simulación tienen como antecedentes una serie de modelos de crecimiento y desarrollo que aparecieron en la década del '90 gracias a los trabajos de investigación realizados. En el caso del modelo de cultivo de arroz ORYZA2000, estos trabajos surgieron como parte de las actividades realizadas en el marco del proyecto "Simulation and System Analysis for Rice Production (SARP)" (ten Berge and Kropff, 1995; Bouman et al, 1996). Esta versión es una actualización e integración de los modelos ORYZA1 de producción potencial (Kropff et al, 1994), ORYZA_W para rinde limitado por escasez de agua (Wopereis et al, 1996), ORYZA_N para rinde limitado por escasez de nitrógeno (Drenth et al, 1994). Esta última versión del modelo simula el crecimiento y desarrollo del cultivo en situaciones de: rinde potencial, con limitaciones de agua y con limitaciones de nitrógeno. (de Wit and Penning de Vries, 1982).

- Rinde potencial: Crecimiento ocurrido en condiciones de amplia oferta de agua y nutrientes. El crecimiento de la planta está determinado por sus características varietales y las condiciones meteorológicas (radiación y temperatura).
- Rinde con limitaciones de agua: El rinde potencial está limitado por falta de agua en la última parte de su desarrollo.
- Rinde con limitantes en Nitrógeno: El crecimiento está limitado por falta de nitrógeno en la última parte de su desarrollo.

En todas estas condiciones se supone que el cultivo está protegido de pestes, enfermedades, ocurrencia de eventos naturales adversos como vientos fuertes, granizo, etc.

El grupo de Climatología Agrícola de la Facultad de Ciencias Agropecuarias UNER tiene experiencia en la calibración de este tipo de modelos (Aguirre, 1995; Brizuela et al, 1995). Durante la campaña 1994/1995 realizó la pre-calibración del modelo CERES RICE, de similares características al ORYZA2000, en la zona arroceras del noroeste de la Provincia de Entre Ríos. En esa oportunidad se instalaron sensores de temperatura-humedad y pluviómetros en campos de productores arroceros de la zona con el fin de relevar los datos meteorológicos necesarios para la calibración de los cultivares de arroz *El Paso 144*, *Lemont* y *Fortuna*. Los datos de radiación y viento fueron obtenidos de la estación meteorológica “Libertador” ubicada en el departamento Esquina (Corrientes) dependiente de la Secretaría de Energía y Recursos Hídricos de la Provincia de Santa Fe. Con los datos de las muestras cosechadas en forma escalonada durante el ciclo del cultivo fueron ajustados estos tres cultivares. Se realizaron corridas múltiples del modelo utilizando los datos correspondientes a los suelos “Tacuara” y “Complejo Paso Telégrafo” para tres fechas de siembra en los meses de Septiembre, Octubre y Noviembre. Los resultados de la campaña sirvieron para la calibración preliminar y posterior utilización del modelo con el fin de obtener los valores de rendimiento en el marco del Proyecto de Investigación “Estimación de la producción agrícola mediante fotografía infrarroja y modelos agroclimáticos” que llevaron a cabo investigadores de la Cátedra de Climatología dependiente de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Entre Ríos.

Definiciones y clasificación de los modelos de cultivo

Para comprender la filosofía de concepción de los modelos de simulación de crecimiento de cultivos, es necesario precisar algunos conceptos y definiciones de uso corriente en este tema:

- Sistema: Parte limitada del universo objeto de estudio.
Límites: Contorno ideal de un sistema por el que puede atravesar energía o materia.
Modelo: Representación simplificada de un sistema.
Simulación: Representación en el espacio y/o tiempo del funcionamiento de un modelo para el estudio del comportamiento del mismo en relación al sistema real.

Para el caso de cultivos, el sistema es una porción de la fitósfera que intercambia con el medio exterior energía, nutrientes, agua, etc.

Existe una cantidad muy importante y variada de modelos para pronóstico de cosechas. Ellos han sido concebidos para diferentes propósitos. Algunos de ellos abordan uno o dos aspectos que, a criterio del analista, representan los factores limitantes en los rindes. Es por ello que para estos modelos no es necesario simular todos los procesos fisiológicos del crecimiento de la planta sino que se relacionan los factores más relevantes a través de índices que luego correlacionan con los rindes. Otros, en cambio, permiten obtener una descripción de todos los procesos fisiológicos para cada parte de la planta “haciéndola crecer” en función de los algoritmos que simulan estos procesos. Estos modelos permiten obtener directamente los componentes de rendimiento.

Una clasificación que se basa en la filosofía de cada uno de ellos los distingue en “Modelos Descriptivos” y “Modelos Explicativos”:

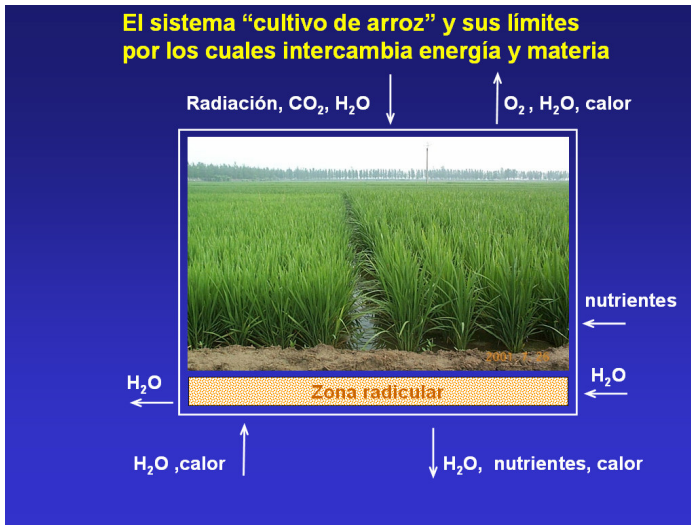
- **Descriptivos:** describen las relaciones entre los factores y las respuestas del cultivo sin explicar las mismas (p.e. fotosíntesis de la hoja como función de la radiación solar, Índice de satisfacción de las necesidades hídricas como función del rendimiento). Estos modelos necesitan calibración previa y los resultados deben ser correlacionados con la respuesta del cultivo que se desea obtener (por ejemplo Índice con rendimiento). Esta correlación no es universal y debe realizarse cada vez que se desee aplicar el modelo en otros lugares. Éstos también se conocen como *Modelos empírico-estadísticos*.
- **Explicativos:** expresan las relaciones entre los factores y las respuestas del cultivo a través de modelos físico-matemáticos que se sustentan en hipótesis científicamente comprobadas (por ejemplo modelo de asimilación de CO₂ en una la hoja). Estos modelos necesitan calibración previa pero brindan directamente los resultados de las componentes de rinde. Una vez calibrado para el cultivar de interés, puede aplicarse en otros lugares sin necesidad de re-calibración ya que el modelo permite considerar los diferentes factores

que pueden variar con el lugar (como clima, suelo, etc) en forma directa. Éstos se conocen como *Modelos de Simulación de crecimiento*.

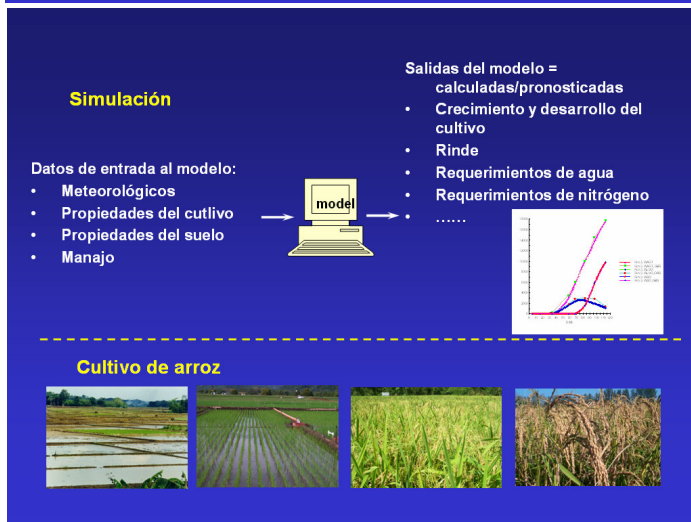
Modelos de simulación de crecimiento de cultivos

Son de gran interés en investigación ya que simulan la mayoría de los procesos fisiológicos. Permiten considerar al cultivo como un sistema que interactúa con el medio a través de sus límites. Las interacciones entre el sistema y el medio exterior son representadas por el intercambio de energía (radiación en onda corta y onda larga, conducción y convección), intercambio de gases, agua y nutrientes. Conociendo el ritmo con el cual se intercambian estos elementos se pueden modelar los fenómenos fisiológicos que se producen y predecir el crecimiento del cultivo.

Para iniciar el modelo, es necesario además conocer los valores que toman las variables al instante inicial, es decir “las condiciones iniciales”.



Estos modelos requieren gran cantidad de datos de entrada para su funcionamiento. Estos datos son de diferente clase: meteorológicos, características del suelo, propiedades del cultivo y manejo del mismo como también de agua, nutrientes, etc. Como contraparte, brindan gran cantidad de resultados para el análisis y permiten además predecir los requerimientos que serán necesarios para lograr un rinde óptimo. Otra ventaja es la de poder realizar simulaciones de diferentes escenarios de manejo propuesto, como fechas de siembra, densidad, profundidad, cantidad agua de riego, dosis de fertilizantes, etc, con el fin de evaluar a priori las diferentes alternativas de gestión de insumos y programación.

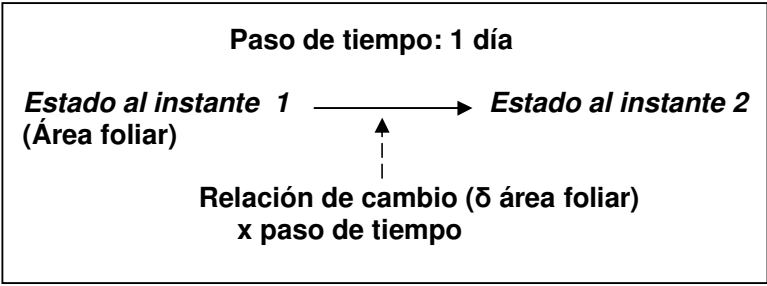


Los datos meteorológicos de entrada son requeridos de manera periódica, los datos de las propiedades del cultivo y suelo en cambio son necesarios al comienzo de la simulación. Los datos de manejo serán requeridos según la programación de tareas designadas (siembra, profundidad, riego, incorporación de dosis de fertilizantes, etc.). El modelo de simulación realizará los cálculos y brindará los resultados del estado de las diferentes variables

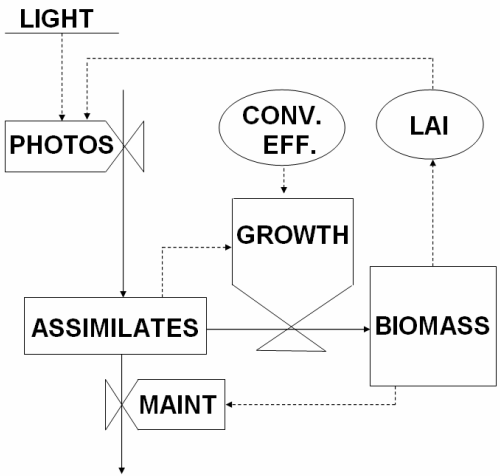
consideradas. Los valores de estas variables se calcularán en pasos de tiempo definidos, en general, por la periodicidad con que se requieren los datos meteorológicos. En la mayoría de estos modelos, este intervalo de tiempo es de 1 día. Por ejemplo para el cálculo de área foliar:

Variables de estado (área foliar, biomasa, ETP, ETR.)

- El estado de un sistema puede ser definido en cualquier momento.
- Los cambios del estado del sistema son calculados en función de las variables de entrada para los modelos en cada paso de tiempo de la simulación.



El siguiente esquema muestra la forma en que interactúan los diferentes algoritmos para el cálculo de área foliar. Puede notarse que varios de estos algoritmos no sólo consideran como datos de entrada los valores que toman las variables meteorológicas, de cultivo o manejo sino que además necesita de los resultados obtenidos a partir de otros algoritmos. De esta forma se ve claramente la interacción que existe entre las diferentes partes del modelo:



En el algoritmo que calcula la fotosíntesis *PHOTO* se necesitan como datos de entrada la radiación solar y el resultado que se obtiene del módulo *LAI* para evaluar el área de intercepción de la radiación por la planta. Una vez realizado el cálculo de radiación fotosintéticamente activa es necesario conocer si la planta es C_3 o C_4 para obtener la asimilación neta de carbono *ASSIMILATES*. El módulo *PHOTO* pasa el resultado *ASSIMILATES* al módulo *GROWTH* que realiza el cálculo de la cantidad neta de biomasa generada *BIOMASS* en gramos de materia por hectárea y por hora utilizando coeficientes de eficiencia de conversión. Una parte de la biomasa será utilizada en el crecimiento de hojas incrementando el índice de área foliar *LAI*, otra en el crecimiento de tallo y el resto para el crecimiento de las raíces en el caso de encontrarse la planta en el subperíodo vegetativo. De esta forma, el nuevo valor de índice de área foliar *LAI* servirá como dato de entrada en el próximo paso de tiempo (día siguiente) para el módulo *PHOTOS*.

Objetivos y aplicaciones de los modelos de simulación de crecimiento de cultivos:

Pueden mencionarse algunos de los objetivos y aplicaciones que tienen este tipo de modelos tanto en investigación como así también para el análisis de diferentes alternativas de manejo y diagnóstico a campo o en la utilización racional y optimización de los recursos e insumos que necesita el cultivo:

- Conocer y entender los procesos fisiológicos.
- Analizar datos experimentales para estudiar el comportamiento de diferentes cultivares en una zona.
- Conocer los rindes potenciales de un cultivar.

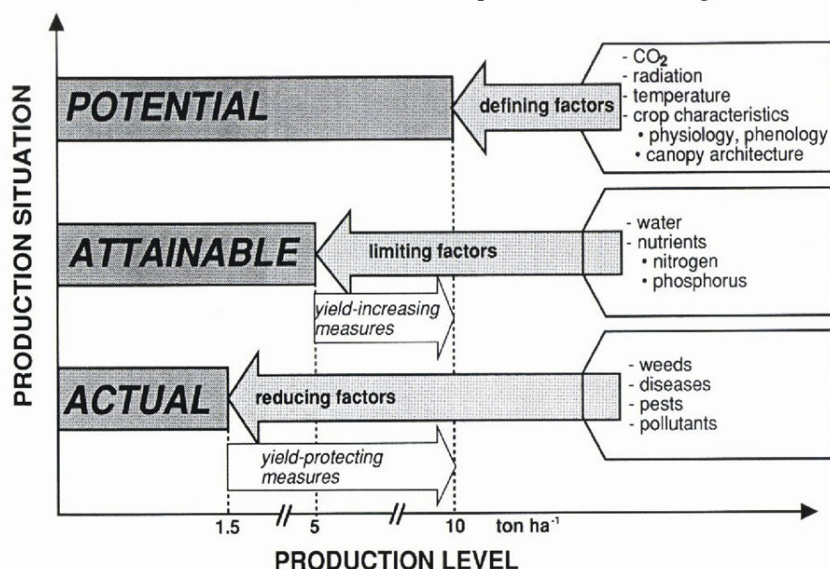
- Extrapolar resultados de una región a otra o de un año a otro.
- Optimizar los recursos para un manejo eficiente del cultivo.
- Diseñar un ideotipo de cultivar.
- Zonificación agroecológica del cultivar.
- Estudiar los efectos de cambio climático.

Filosofía de los modelos de simulación de cultivos:

La filosofía que ha sido adoptada para el estudio de los procesos fisiológicos utilizando modelos de simulación se basa en la concepción de tres niveles de aproximación. Estos niveles están relacionados con los rindes del cultivo.

- *Rinde Potencial*: El primer nivel es el que requiere menos variables ya que considera que el suelo no limita los rindes, es decir que el cultivo crece en condiciones óptimas desde el punto de vista del suministro de agua y nutrientes. Además, es inmune a plagas y enfermedades. Para obtener el rinde potencial del cultivo son necesarios los datos de Radiación solar, Temperatura y las características del cultivo como fisiología, fenología, arquitectura de la planta y manejo. En esta etapa se realizan las simulaciones de los procesos de fotosíntesis, respiración, aumento de materia verde, partición de materia en los diferentes órganos y crecimiento de raíces sin limitantes de nutrientes y agua.
- *Rinde Alcanzable*: El segundo nivel de aproximación incluye las limitantes inherentes al suelo. Estas son los aportes de agua y nutrientes que necesita el cultivo para su crecimiento y desarrollo. Se incluyen en esta etapa los submodelos de balance de agua y nutrientes. El balance de agua se realiza considerando los aportes de la lluvia y riego y las pérdidas son la evapotranspiración real, el escurrimiento y percolación. Este balance se realiza teniendo en cuenta las constantes hidrológicas del suelo por horizonte y según la profundidad radicular. De la misma manera para los nutrientes se realizan balances de Nitrógeno y Fósforo.
- *Rinde Real*: En este caso se deben considerar las mermas en los rindes ocasionados por la aparición de pestes, enfermedades, competición de nutrientes y agua por la presencia de malezas, heterogeneidades en las propiedades del suelo, etc. En general, estos aspectos no son contemplados por los modelos de simulación de cultivos. La siguiente figura presenta un esquema que muestra la merma en los rindes en relación a las limitantes consideradas según los niveles de aproximación.

Schematization of the production system:



Considerando los tres niveles de aproximación es posible concebir el modelo teniendo en cuenta las variables que actúan en cada nivel. Para el primer nivel se deben modelar los procesos de absorción de energía, respiración, asimilación de Carbono, crecimiento de hojas, tallo, raíces y partición de materia. Para modelar estos fenómenos son necesarios datos de temperatura (acción auxígena), radiación solar y fotoperíodo (acción anaptígena), características del cultivo como tipo de asimilación de carbono para fotosíntesis, constante térmica por sub-períodos, arquitectura foliar, etc. Cabe resaltar que en este primer nivel no son necesarios datos de precipitación, nutrientes, riego, propiedades agrohidrológicas del suelo, etc ya que se considera que estos factores no son limitantes puesto que se desea obtener el rinde potencial.

Simulación de crecimiento y desarrollo Potencial

Como se mencionó anteriormente, se realiza la simulación de crecimiento y desarrollo de la planta considerando que las propiedades del suelo no limitan los rindes, es decir que el cultivo crecerá sin limitaciones de agua y nutrientes. El rinde potencial indica entonces los rindes máximos alcanzados por un cultivar en particular y en un lugar o región determinados. Estos rindes están limitados por los valores de radiación y temperatura a que está expuesto el vegetal.

Se realizan las simulaciones de los procesos de fotosíntesis, asimilación neta de Carbono, producción de biomasa y desarrollo que considera la diferenciación de órganos de la planta.

o Crecimiento

Las reacciones químicas que son simuladas por el modelo en el proceso de fotosíntesis y respiración dan lugar al crecimiento neto de Kgr/ha/día de materia:

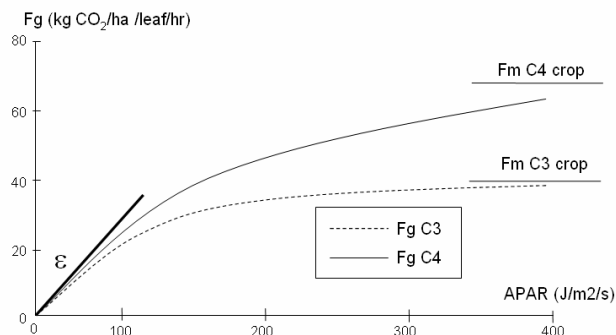
Fotosíntesis (CO₂ asimilación): $CO_2 + H_2O + \text{energía solar} \Rightarrow CH_2O + O_2$

Respiración (crecimiento): $CH_2O + O_2 \Rightarrow CO_2 + H_2O + \text{energía química}$

Asimilación - respiración = crecimiento neto (Kgr/ha/día)

Para considerar la asimilación de CO₂ debe conocerse la relación de conversión o rapidez de la reacción en función de la energía radiante interceptada por las hojas. Esta energía será entonces proporcional al Índice de Área Foliar (LAI). Es conveniente entonces conocer el valor de asimilación de CO₂ como función de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por una hoja (APAR) para luego integrar este resultado en todo el cultivo utilizando el valor de LAI. Esta relación de conversión será diferente para plantas clasificadas como C₃ o C₄. Estudios experimentales proporcionan curvas de absorción para estos dos tipos de vegetales como se muestra en la siguiente figura:

Curva de respuesta a la iluminación de una hoja:



F_g = relación de asimilación bruta de CO₂
 F_m = relación máx de asimilación de CO₂ (altas intensidades luminosas)
 ε = Eficiencia inicial en el uso de la luz
 APAR = Radiación fotosintéticamente activa absorbida.

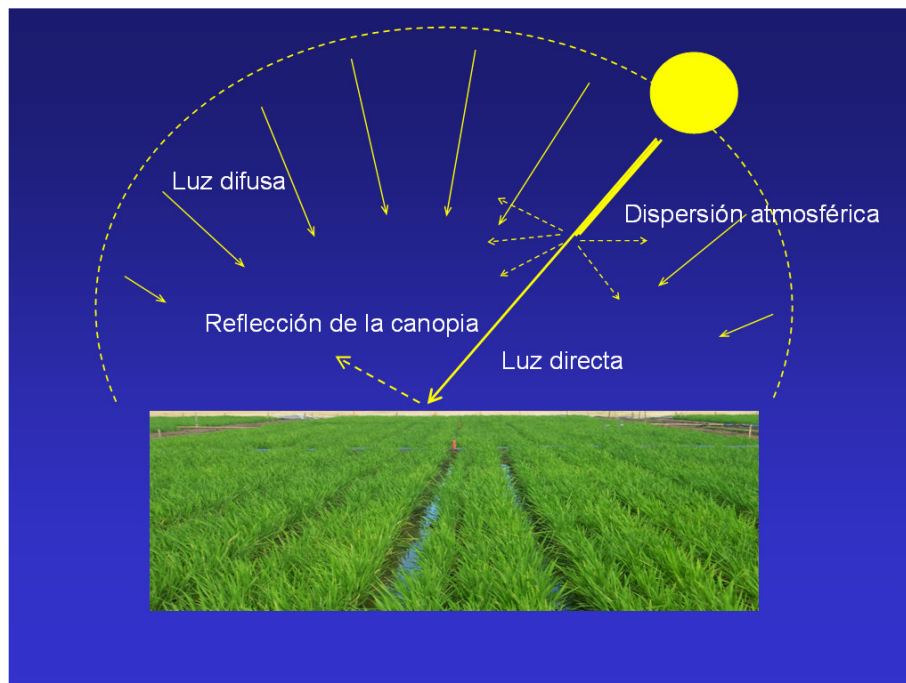
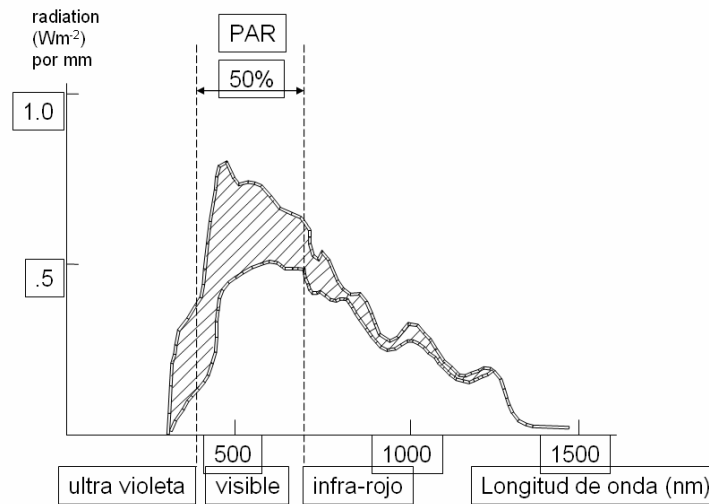
$$F_g = F_m (1 - e^{-APAR \varepsilon / F_m})$$

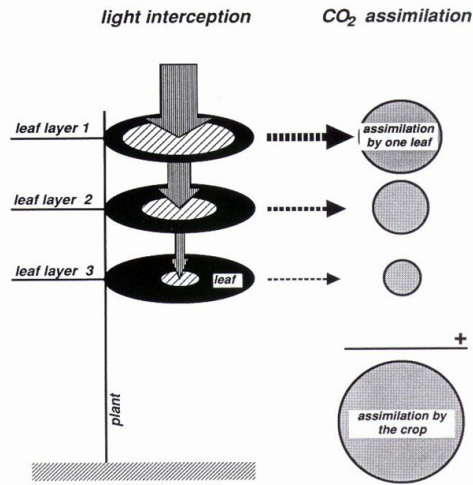
El modelo permite conocer la relación de asimilación bruta de CO₂ en función de la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida y del tipo de planta. Para conocer la cantidad de CO₂ absorbida por el cultivo en un día se debe integrar el valor de asimilación bruta desde la salida a la puesta del sol y para toda el área foliar del cultivo.

Para la integración durante el transcurso del día solar se considera la latitud del lugar, la declinación del sol y se calcula la hora de salida y puesta del sol. Posteriormente se realiza la integración considerando que la energía incidente dependerá del ángulo de inclinación de los rayos solares según la ley de Lambert.

Para la integración en toda el área foliar debe considerarse el coeficiente de reflexión del cultivo y la atenuación de la radiación a medida que la energía penetra en el follaje. Esta atenuación depende del coeficiente de extinción de energía K relacionado a la arquitectura foliar.

$$PAR_d = PAR_0 e^{(-k LAI)} = PAR (1 - \alpha_p) e^{(-k LAI)}$$





Para el cálculo de la asimilación neta de CO_2 deben considerarse los pesos moleculares de CO_2 y de CH_2O ya que en el proceso de fotosíntesis se obtiene:



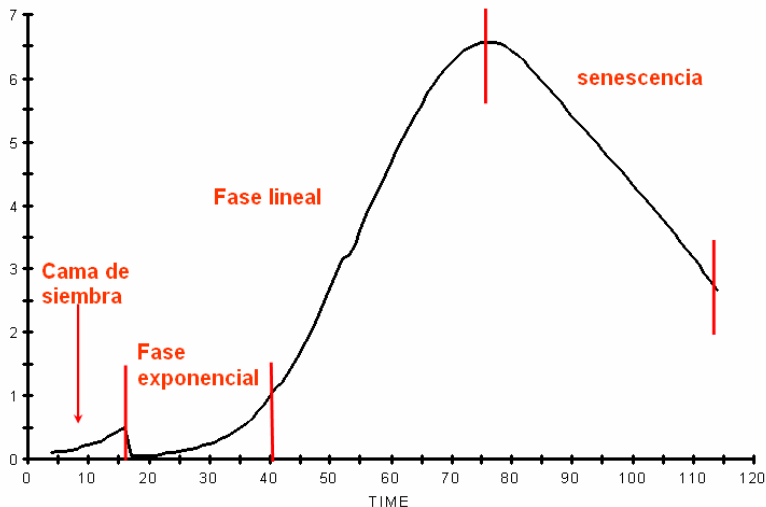
Peso molecular de CO_2 es 30
 Peso molecular de CH_2O es 44

Para calcular la asimilación neta de CO_2 :

$$1 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1} \text{ relación de asimilación} = 30/44 \text{ kg CH}_2\text{O ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$$

En relación al aumento de Índice de Área Foliar se debe considerar para cada cultivar en particular la relación entre éste y las sumas térmicas. Volviendo al caso del arroz, en la siguiente figura se observa que la curva de aumento de LAI luego del transplante posee tres zonas bien definidas. La zona de crecimiento exponencial, la de crecimiento lineal y por último la de senescencia de las hojas.

Índice de área foliar (ha hoja ha^{-1} suelo)



Fase exponencial: el crecimiento del área de la hoja es determinada por la temperatura.

$$LAI_t = LAI_0 e^{(RGRL \cdot T_{sum})}$$

RGRL = Relative Growth Rate Leaves ($^{\circ}\text{C día}^{-1}$)
(relación de crecimiento relativo de hojas)

Tsum = Suma de temperaturas desde emergencia ($^{\circ}\text{C día}$)

Fase lineal: el crecimiento del área de la hoja es determinada por la asimilación disponible, expresada en peso de hojas.

$$LAI_t = SLA \cdot Wlv_{g,t}$$

SLA = Área específica de la hoja ($\text{ha hoja} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ hoja}$)

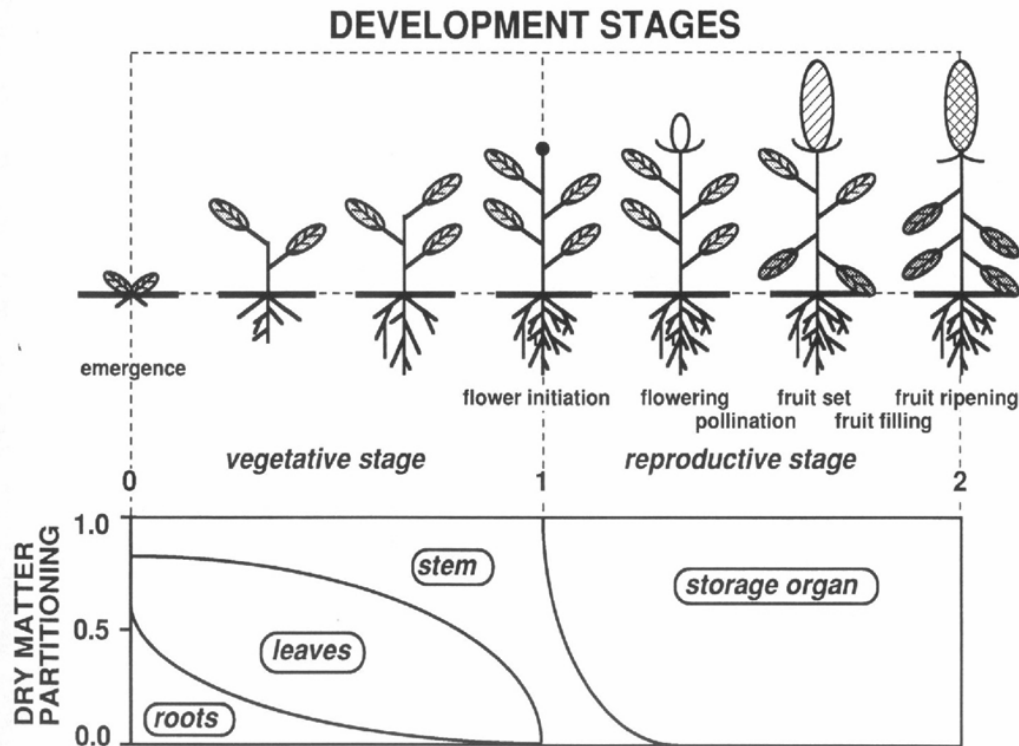
Wlv_g = Peso de las hojas verdes ($\text{kg hojas} \cdot \text{ha}^{-1}$ superficie de suelo)

○ Desarrollo

Para el desarrollo el cultivar se considera la constante térmica por subperíodos y el fotoperiodismo que induce la aparición de órganos diferentes en el vegetal.

Tomando nuevamente el ejemplo del cultivo de arroz y para el modelo ORYZA200 se han considerado dos subperíodos:

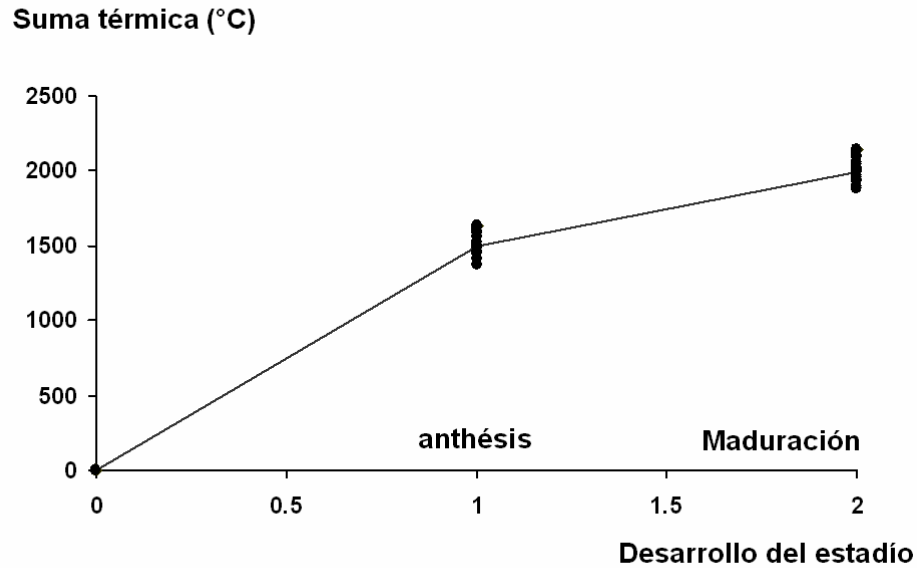
- 1- El subperíodo de crecimiento vegetativo en el cual la materia es repartida en el crecimiento de las hojas, el tallo y las raíces.
- 2- El subperíodo reproductivo en el que aparecen y se transforman los órganos para dar origen al grano. En esta etapa el cultivo canaliza la materia hacia la formación y llenado del mismo.



Son consideradas en este caso dos constantes térmicas:

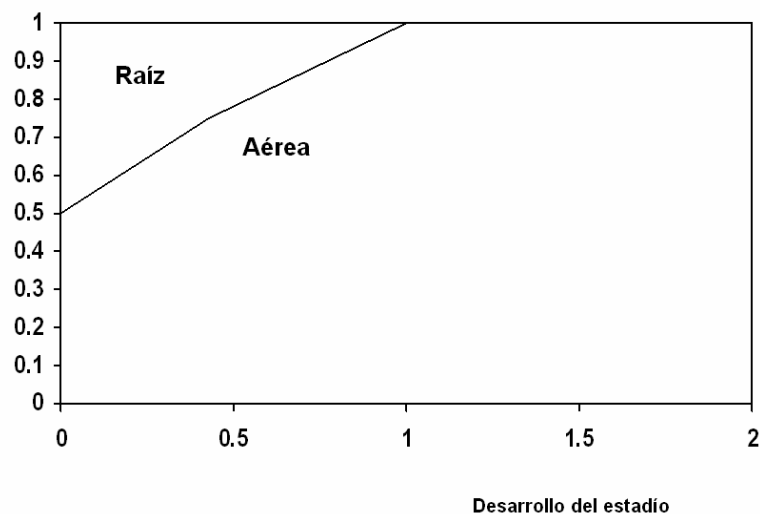
emergencia -> anthesis	anthesis -> madurez
$UDC_{e-a} = \int (T - T_b) dt$	$UDC_{a-m} = \int (T - T_b) dt$

En la figura siguiente se observa la relación entre el desarrollo del cultivo de arroz en relación a las sumas térmicas para un cultivar determinado. Cabe acotar que estas constantes térmicas varían en función del cultivar y deben ajustarse estos valores con ayuda de experiencias a campo en la etapa de pre-calibración si no se dispone de las mismas.



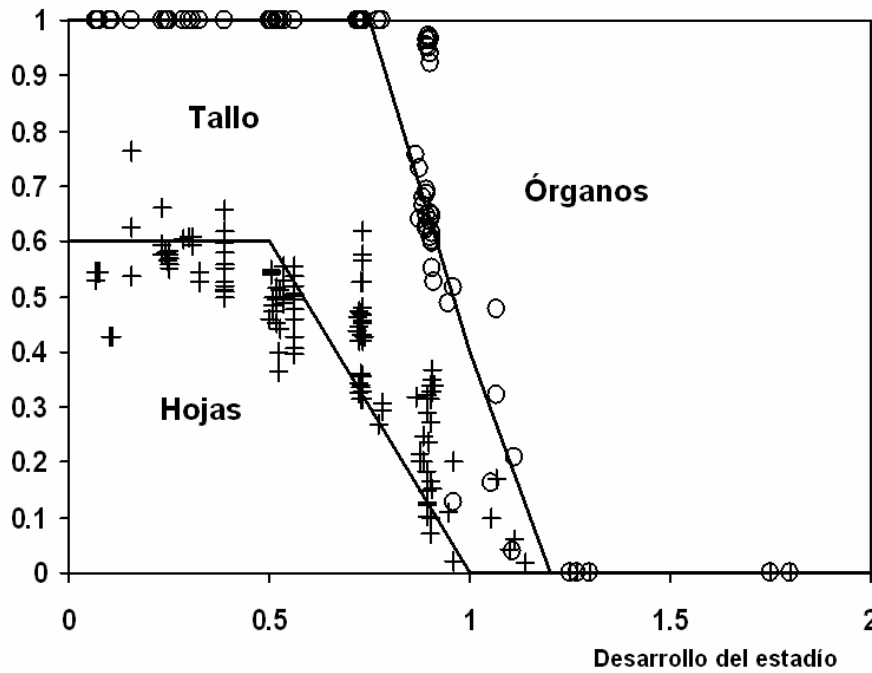
La siguiente figura muestra la fracción diaria de incremento de materia seca y su partición en la zona aérea de la planta y la zona radicular en función del desarrollo de la misma. Puede observarse como la raíz de la planta crece más lentamente hasta detener su crecimiento al momento de anthésis.

Fracción diaria de incremento de materia seca

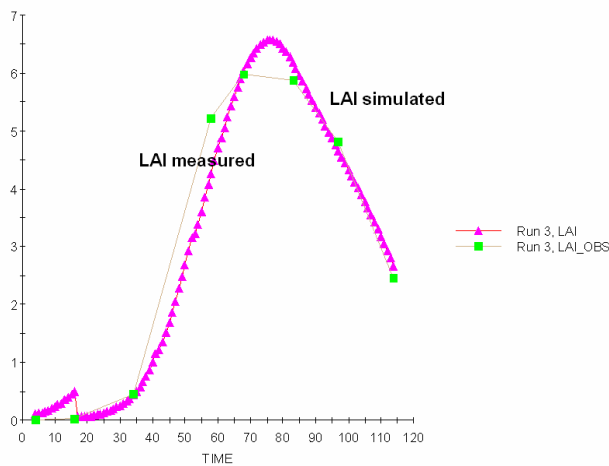


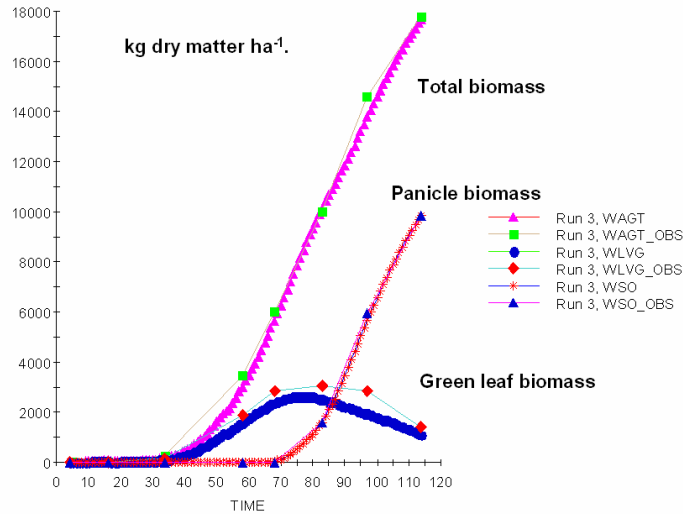
En la parte aérea, la materia orgánica es repartida entre tallo, hojas y órganos. Esta relación de reparto es también función del estadio fenológico del vegetal como lo muestra la siguiente figura para el caso del cultivo de arroz. Los símbolos indican las mediciones de peso de materia seca por órgano para diferentes ensayos a campo.

Fracción diaria de incremento de materia seca



Las siguientes figuras muestran comparaciones entre los resultados de simulación del modelo ORYZA2000 para cultivo de arroz y las mediciones realizadas en ensayos a campo. La primera figura muestra la variación en el Índice de Área Foliar y la segunda el crecimiento de los diferentes órganos de la planta con el transcurrir del tiempo:



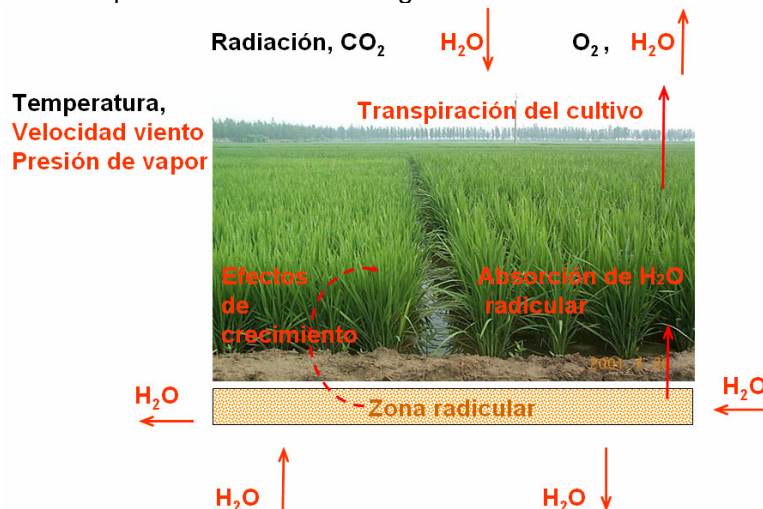


Simulación de crecimiento y desarrollo limitado

En el punto anterior se ha considerado que los rindes no están limitados por escasez de agua ni de nutrientes. Esto permite conocer el valor de rinde más alto esperado para un cultivar implantado en una región. La simulación de las condiciones de crecimiento y desarrollo considerando el agua y nutrientes como limitantes, permiten estudiar el efecto de estos factores en el rinde. Su eficiencia y oportunidad de uso serán los objetivos de la utilización de esta herramienta de simulación. Los resultados de diferentes alternativas de implementación de estos insumos permitirán comparar diferentes posibilidades de manejo de los mismos para lograr alcanzar un uso eficiente y óptimo. Para lograr este objetivo, se adicionarán a los submodelos que componen el nivel de rinde potencial los submodelos de balance de agua y nutrientes. Para ello es necesario conocer la composición del suelo y algunas propiedades agrohidrológicas del mismo. Como es sabido, el suelo es dividido idealmente en capas o sustratos con propiedades diferentes. La profundidad de estas capas y sus propiedades físicas e hidrológicas están ligadas al tipo de suelo. Se realiza entonces un balance hidrológico seriado y un balance de nitrógeno en el suelo para conocer la disponibilidad de estos recursos en cada sustrato de suelo y hasta la profundidad de crecimiento de las raíces.

Balance de agua

Si se considera el balance de agua, el modelo de simulación del sistema se completa entonces adicionando los factores que se muestran en la figura:



Los datos necesarios para realizar la simulación de modelo considerando la limitante de agua son los siguientes:

Características del suelo:

- Profundidad de los substratos con características diferentes.
- Capacidad de campo y Punto de marchitez.
- Tabla de percolación del suelo.
- Tabla de conductividad hidráulica del suelo.
- Pendiente.

Datos meteorológicos complementarios:

Además de los que son necesarios para el nivel de rinde potencial (temperatura del aire y radiación solar) se incorporan datos de tensión de vapor del aire y velocidad de viento para el cálculo de la evapotranspiración potencial y los datos de precipitación serán incluidos en el balance hidrológico seriado.

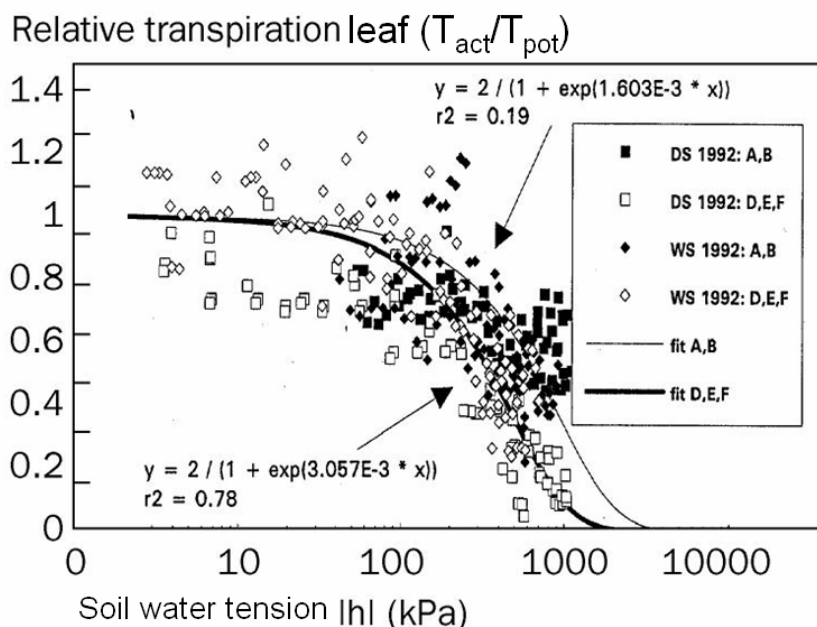
Los datos de riego serán también incluidos como precipitación en el balance hidrológico.

Los procesos de crecimiento son afectados por la disponibilidad de agua en el suelo. La tensión de agua en el suelo afecta a la transpiración, fotosíntesis, expansión de hojas, asimilación de CO_2 , repartición de materia entre los órganos de la planta, profundidad radicular, índice de área foliar y duración de los subperíodos del vegetal.

La disponibilidad de agua en el suelo es el resultado del cálculo de balance hídrico en el que intervienen:

- la tensión de suelo para retener el agua es función del contenido de humedad del suelo.
- El contenido de humedad del suelo es a su vez función de: lluvia, riego, evapotranspiración, percolación, escurrimiento.

La fotosíntesis, que permite la asimilación bruta de CO_2 , se verá limitada por la disponibilidad de agua en las hojas del vegetal. De esta forma la cantidad de CO_2 que circula por las hojas y tallos del vegetal será proporcional a la fotosíntesis y a la cantidad de H_2O de agua que circula por estos órganos. La apertura de los estomas de la hoja determina el flujo de estas sustancias a través de la planta. De esta forma cuando el agua es limitante, los estomas se cierran y la circulación de agua y CO_2 se reduce. La relación que existe entre la tensión de suelo que es ejercida para retener el agua y la relación entre la cantidad de agua transpirada versus la potencialmente transpirada puede verse en la siguiente figura para diferentes ensayos de cultivo de arroz:



De esta forma se observa que si el suelo no ejerce tensión para retener el agua o esta es muy leve (10 KPa) puede admitirse que la transpiración actual (T_{act}) es igual a la que potencialmente se produciría sin restricciones de agua (T_{pot}). A medida que el suelo posee menor contenido de agua, el mismo ejerce mayor presión para retenerla evitando que esté disponible para las plantas. El punto de marchitez se alcanza cuando el suelo presenta una tensión superior a 1000 KPa en este ejemplo.

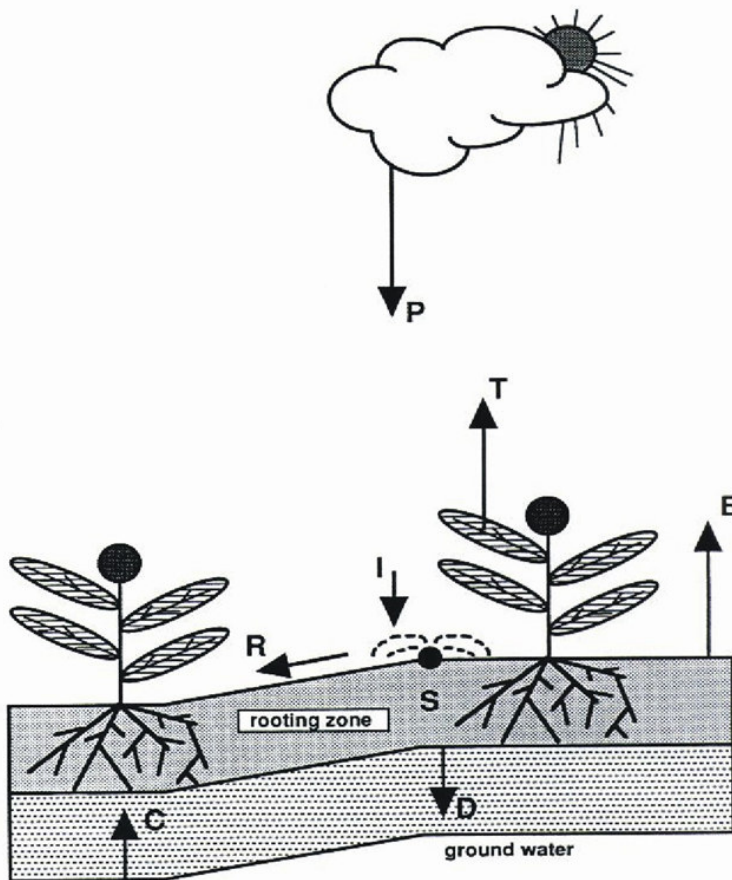
El valor de la cantidad de agua evapotranspirada potencialmente por el cultivo (T_{pot}) no es constante durante el ciclo de vida del vegetal. Ésta depende del estadio fenológico del mismo:

$$T_{pot} = ETP \cdot Kc$$

Donde ETP es la evapotranspiración potencial de un cultivo de referencia considerando como tal una gramínea corta y compacta que cubre el suelo completamente. De esta manera la ETP no depende ni del cultivo, ni del estadio fenológico ni de la cantidad de agua que posea el suelo. Por tanto sólo depende de los valores que tomen las variables meteorológicas expresando la necesidad de agua de la atmósfera. Estas variables son: la radiación neta en la fitósfera (Onda corta y Onda larga), la temperatura del aire, la tensión de vapor o en su defecto la humedad relativa del aire y el viento.

Las curvas de variación de coeficiente de cultivo (Kc) en función del estadio fenológico serán necesarias para obtener el parámetro (T_{opt}). Estas curvas pueden encontrarse en Doorenbos and Pruitt, 1978.

Los diferentes procesos de movimiento de agua en el suelo y en la planta son modelados según el siguiente esquema:



Balance de agua en el suelo

Representación esquemática de los factores involucrados en el balance de agua con indicación del agua almacenada y flujos en el sistema suelo-planta-atmósfera.

- E - evaporación;
- T - transpiración;
- P - precipitación;
- I - irrigación;
- R - percolación;
- D - drenaje;
- C - capilaridad radicular;
- S - contenido de agua en la zona radicular.

Bibliografía

- Aguirre, C. A. 1995. *Estimación de la producción de arroz en el noreste entrerriano*. Resumen Técnico del Proyecto: Estimación de la producción agrícola mediante fotografía infrarroja y modelos agroclimáticos. Universidad Nacional de Entre Ríos – Facultad de Ciencias Agropecuarias. pp 1 - 9.
- Bouman B. A. M., H. van Keulen, H. H. van Laar and R. Rabbinage. 1996. *The 'School of Wit' Crop growth Simulation Models: Pedigree and Historical Overview*. Agricultural System **52**. ELSEVIER. pp 171 – 198.
- Bouman, B. A. M., M. J. Kropff, T. P. Toung, M. C. S. Wopereis, H. F. M. ten Berge and H. H. van Laar 2001. *ORYZA2000 – Modeling lowland rice*. Copyright Internacional Rice Research Institute – IRRI. Editor: Bill Hardy. Los Baños, Philippines. ISBN 97122-0171-6. pp 1- 235.
- Bouman B. A. M. and H. H. van Laar. 2004. *Description and Evaluation of the Rice Growth Model ORYZA2000 under Nitrogen-limited Conditions*. Agricultural System **87**. ELSEVIER. pp 250 – 273.
- Brizuela, A. B., M. Wilson and C. A. Aguirre. 1995. *Preliminary Test with CERES Models – Wheat and Rice – in Entre Ríos, Argentina*. System Approaches for Agricultural Development 2 - International Rice Research Institute (IRRI), Manila, 1995. pp 1 – 9.
- Casanova D., J. Goudriaan and A. D. Bosch. 2000. *Testing the Performance of ORYZA1, an Explanatory Model for Rice Growth Simulation, for Mediterranean Conditions*. European Journal of Agronomy **12**. ELSEVIER. pp 176 – 189.
- de Wit C. T. and F. W. T. Penning de Vries. 1982. *L'Analyse des Systèmes de Production Primaire*. Agricultural Research **918**. Wageningen – Netherlands. pp 1 – 141.
- Doorenbos J. and W. O. Pruitt. 1984. *Las Necesidades de Agua de los Cultivos*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Colección Estudio FAO – riego y Drenaje **24**. Roma. pp 1 – 194.
- Drenth H., F. F. M. ten Berge and J. J. M. Riethoven. 1994. *ORYZA Simulation Modules for Potential and Nitrogen Limited Rice Production*. SARP Research Proceedings. Wageningen – Netherlands. IRRI/AB-DLO. pp 1 – 223
- Kropff M. J., H. H. van Laar and R. B. Matthews. 1994. *ORYZA1: an Ecophysiological Model for Irrigated Rice Production*. SARP Research Proceedings. Wageningen – Netherland. IRRI/AB-DLO. pp 1 – 110.
- Maas S. J. and G. F. Arkin. 1978. *User's Guide to SORGF: A Dynamic Grain Sorghum Growth Model with Feedback Capacity*. Blackland Research Center – Temple, Texas. pp 1 – 72.
- ten Berge H. F. M. and M. J. Kropff. 1995. *Founding a System Research Network for Rice*. Eco-Regional Approaches for sustainable Land Use and Food Production. Kluwer Academic Publishers. Netherlands. pp 263 282.
- Wopereis M.C.S., B. A. M. Bouman, T.P. Toung, H. F. M. ten Berge and M. J. Kropff. 1996. *ORYZA_W: Rice Growth Model for Irrigated and Rain fed Environments*. SARP Research Proceedings. Wageningen – Netherlands. IRRI/AB-DLO. pp 1 – 159.